

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Diseño de antena en tecnología EBG de alta directividad sobre substrato de silicio para frecuencias milimétricas



Grado en Ingeniería
en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Autor: Marcos Lázaro Rada

Director: Juan Carlos Iriarte Galarregui

Pamplona, 12 de Junio de 2020





UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA
E.T.S.I.I. y de Telecomunicación
Campus de Arrosadía s/n
31006-Pamplona Navarra-Spain
Tfno: 34-948-169000 Fax: 34-948-169169

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Acta de Trabajo Fin de Grado

Título:

***“Diseño de antena en tecnología EBG de alta directividad sobre
substrato de silicio para frecuencias milimétricas”***

Alumno: Marcos Lázaro Rada

Tutor del Proyecto: Dr. Juan Carlos Iriarte Galarregui

Reunido el tribunal, compuesto por los siguientes miembros,

Presidente,

Secretario,

Vocal 1º,

Fdo:.....

Fdo:.....

Fdo:.....

acuerda otorgar la calificación de

--

Pamplona, a 12 de Junio de 2020

RESUMEN

En los últimos años se ha investigado la utilización de la tecnología EBG en rangos milimétricos debido a que es capaz de superar limitaciones impuestas por la tecnología convencional. Esta tecnología ofrece alternativas a los diseñadores para generar filtros, guías o para aumentar la directividad de antenas simplificando la red de alimentación o eliminar acoplos o modos de substrato.

En este proyecto se mostrará el diseño realizado de una antena en tecnología EBG a frecuencias milimétricas, para su posterior fabricación en la sala limpia del laboratorio. El objetivo es realizar un diseño en frecuencias milimétricas de una antena de cavidad EBG que pueda fabricarse utilizando un substrato de silicio como cavidad y una rejilla de superestrato como reflector para la propagación dentro de esta. Se obtendrán las dimensiones de la cavidad y del puerto de alimentación para diseñar posteriormente la antena completa.

El diseño se ha realizado en torno a 115 GHz y se busca como objetivo conseguir una directividad cercana a los 20 dBi con una sola fuente de alimentación.

Inicialmente se muestra el diseño del EBG o superficie parcialmente reflectiva para utilizarlo como superstrato de la cavidad. Para el diseño del mismo se ajustará la frecuencia de resonancia de la cavidad suponiendo un EBG infinito a la vez que se ajusta la reflectividad del superstrato.

Una vez ajustado el EBG se presentará el diseño de la antena completa en tecnología EBG con su correspondiente análisis. Dicho análisis se compondrá del diagrama de radiación y las gráficas correspondientes a la directividad y ganancia de la antena a la frecuencia de operación. Se ha conseguido obtener una directividad de unos 20 dBi partiendo de una guía de alimentación que alimenta la cavidad generada.

Por lo tanto, se muestra la viabilidad de realizar un diseño de antena EBG de cavidad utilizando como substrato silicio susceptible de ser fabricado utilizando el equipamiento del Grupo de Antenas de la UPNa.

ABSTRACT

These past years, the use of EBG technology in millimeter frequencies has been investigated because of its capability of overcoming limitations imposed by conventional technology. This technology offers designers alternatives to generate filters, guides or to increase the directivity of antennas by simplifying the feeding network or eliminating couplings or substrate modes.

The aim of this project, the aim is to carry out the preliminary design of an antenna in EBG technology at millimeter frequencies, for its subsequent manufacture in the clean room of the Antennas Group at UPNA. The objective is to make a design in millimeter frequencies of an EBG cavity antenna that can be manufactured using a silicon substrate as a cavity and a superstrate grid as a reflector to allow the propagation through it. The cavity and power port dimensions will be obtained to later design the complete antenna.

The design has been made around 115 GHz and the objective is to achieve a directivity close to 20 dBi with a single feeder.

Initially, the design of the EBG or partially reflective surface to be used as a cavity superstrate is shown. For its design, the resonant frequency of the cavity will be adjusted assuming an infinite EBG while adjusting the reflectivity of the superstrate.

Once the EBG is adjusted, the design of the complete antenna in EBG technology will be presented with its corresponding analysis. The radiation diagram and the graphs corresponding to the directivity and gain of the antenna at the operating frequency are shown. A directivity of about 20 dBi has been obtained starting from a wave guide that feeds the generated cavity.

Therefore, the feasibility of making a cavity EBG antenna design using silicon as a substrate capable of being manufactured using the facilities of the UPNa Antenna Group is shown.

LISTA DE PALABRAS CLAVE

- ELECTROMAGNETIC BAND GAP (EBG)
- CAVIDAD
- ANTENA
- FRECUENCIAS MILIMÉTRICAS
- SILICIO

ÍNDICE

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Tecnología EBG	1
1.2 Frecuencias milimétricas	3
1.3 Software de diseño y simulación	5
1.4 Estructura del proyecto	6
1.4.1 Especificaciones para el diseño de antena en tecnología EBG.....	6
1.4.2 Procedimiento a seguir para el diseño	7

Capítulo 2: NOCIONES BÁSICAS SOBRE TECNOLOGÍA EBG

2.1 Definición de tecnología EBG	9
--	---

Capítulo 3: DISEÑOS PREVIOS AL DISEÑO FINAL DE LA ANTENA EN TECNOLOGÍA EBG

3.1 Introducción	13
3.2 Obtención de dimensiones de la antena EBG	15
3.2.1 Cavity EBG	15
3.3 Adaptación del puerto.....	19

Capítulo 4: DISEÑO Y ANÁLISIS DE LA ANTENA

4.1 Diseño de la antena.....	22
4.2 Resultados obtenidos	26

Capítulo 5: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

BIBLIOGRAFÍA	31
--------------------	----

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

En este capítulo se pretende exponer los conceptos teóricos necesarios para la correcta comprensión de este proyecto, así como entender el objetivo de su diseño en tecnología EBG.

1.1 Tecnología EBG

La tecnología EBG, cuyas siglas significan en inglés *Electromagnetic Band Gap* es aquella que se basa en estructuras periódicas para controlar la propagación de las ondas electromagnéticas en ciertas frecuencias.

Estas estructuras periódicas abrieron nuevas oportunidades, debido a la posibilidad de controlar la propagación de ondas electromagnéticas en 1, 2 o 3 dimensiones dependiendo de las direcciones de periodicidad de la estructura. Asimismo, dichas estructuras nos brindan opciones para superar limitaciones que se tienen en las tecnologías convencionales. [1]

Por un lado, en el campo de las antenas, se usaron diferentes elementos radiantes como parches, antenas de *bowtie*, antenas de ranura, antenas dipolo y antenas espirales que incorporan materiales EBG en algunos estudios. Los diseños preliminares se centraron en mejorar la radiación y en la reducción de los modos del sustrato para hacer coincidir la banda operativa de la antena con el intervalo de banda del EBG.

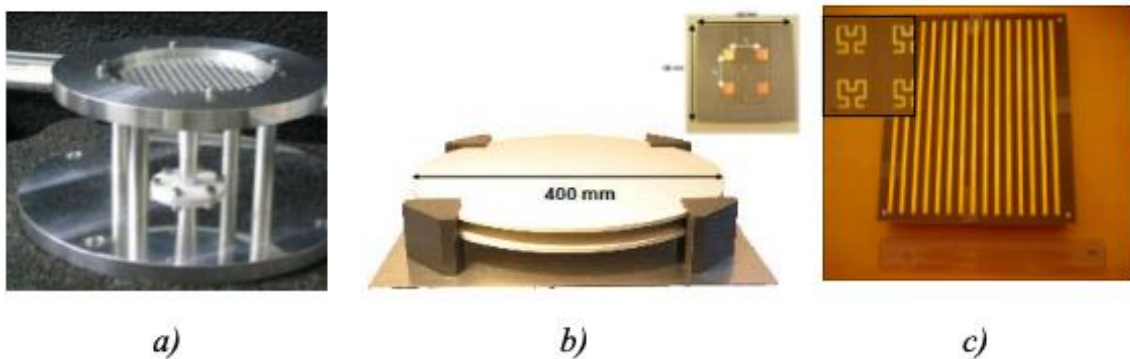


Figura 1. 1 Antenas de superestrato EBG a) Excitada por una antena bocina b) Array de parches 2x2 c) En banda dual arriba y abajo [1]

Por otro lado, en otras configuraciones se aprovecha el EBG para que opere como un reflector. De esta manera, se usa el EBG poniéndolo debajo del elemento radiante para evitar la radiación trasera. La distancia entre el elemento radiante y el EBG son los parámetros principales en el diseño para obtener un patrón optimizado y mejorar la radiación.[1]

Del mismo modo, los EBG también se pueden colocar por encima de una antena funcionando como un *superestrato*, en este caso el EBG tiene que diseñarse con un defecto en la estructura permitiendo la propagación de una determinada banda de frecuencia dentro del intervalo de banda. El defecto al que nos referimos es una pérdida en la periodicidad introducida en la estructura. Estas antenas se denominan antenas de cavidad. La guía de onda se puede obtener mediante los defectos en el material EBG, el defecto limita la potencia, guiándola.

Otro aspecto destacable en este ámbito serían los metamateriales, ya que hoy en día están íntimamente ligados a los EBG, hasta el punto de que es difícil separarlos. Tradicionalmente los metamateriales se han definido como la disposición de elementos estructurales artificiales diseñados para lograr propiedades electromagnéticas inusuales y ventajosas. [1]

En cuanto a las técnicas de fabricación y los diseños EBG, cabe destacar que avanzaron rápido, lo que ha contribuido a estimular el uso de rangos de frecuencia que no habían sido utilizados previamente; este es el caso de las ondas milimétricas, por ejemplo. Además como hemos dicho, la tecnología EBG es una gran alternativa a la convencional para obtener diseños que satisfacen aplicaciones emergentes en banda milimétrica. Un diseño en esta tecnología sería un gran objetivo, y la transición de una tecnología convencional se evitará con un modelo EBG completo.

Del mismo modo, EBG esta suficientemente avanzado para enfocarse en aplicaciones específicas que superan los límites de los diseños convencionales. La mayoría de las aplicaciones de esta tecnología se localizan en el rango de ondas milimétricas y de microondas. Por lo tanto podemos decir que, hoy en día, la tecnología EBG compite con la tecnología convencional, superando sus limitaciones y mejorando sus características en algunas aplicaciones específicas.[1]

1.2 Frecuencias milimétricas

Las frecuencias en banda milimétrica, también denominadas frecuencias extremadamente altas EHF son aquellas comprendidas entre los 30GHz y los 300GHz, es la designación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU.

En la frecuencia de 30 GHz, la longitud de onda de una señal transmitida tiene un valor de 10 mm, y en frecuencias superiores a 30 GHz, la longitud de onda se sitúa en el rango de varios milímetros, lo que lleva a la denominación del rango de onda milimétrica, abarcando, por lo tanto, hasta 300 GHz.

Así pues, este rango, comprendido entre 30 GHz y 300 GHz se divide en varias bandas más específicas como son la banda Ka (26,5-40 GHz) usada en comunicaciones via satélite, la banda V (40-75 GHz) utilizada para la investigación de radar de onda milimétrica y la banda W (75-110 GHz) que es una parte de la región de microondas.

Por su parte, a banda D comienza a 110 GHz y termina a 170 GHz. Los circuitos electrónicos requeridos para aplicaciones por encima de 110 GHz todavía están en las fases de la investigación, y sigue siendo habitual referirse a cualquier rango por encima de 110 GHz como simplemente ondas milimétricas. A continuación, mostramos las frecuencias a las que trabajamos en la banda D.

Rango frecuencial (GHz)	Rango longitud de onda (mm)	Nombre del rango	Bandas
30-40			Banda Ka
40-75			Banda V
75-110	10-1	EHF	Banda W
110-170			Banda D
90-140			Banda F

Tabla 1. 1 Tabla con las diferentes bandas existentes en frecuencias milimétricas [4]

Además tenemos que considerar que las pruebas de antenas eléctricamente grandes y de alta ganancia, así como las de antenas integradas pequeñas en longitudes de onda milimétricas, son extremadamente desafiantes.

Para la transmisión en el rango de ondas milimétricas, la atenuación debida a la pérdida atmosférica es el principal motivo de pérdida y tiende a limitar el alcance de la comunicación de ondas milimétricas. Por lo tanto, debido a estas pérdidas, la correcta comunicación al aire libre en el régimen de ondas milimétricas se limita a rangos de solo unos pocos kilómetros debido a estas pérdidas.

El problema de la atenuación se puede reducir gracias a la directividad sirviéndonos del pequeño tamaño de la antena. Dicho tamaño requerido debe ser proporcional a la longitud de onda; es decir, a frecuencias de onda milimétrica. Conforme la longitud de onda disminuye también lo hace el tamaño de la antena.

El rango de onda milimétrica del espectro es un orden de magnitud más amplio que la parte del espectro donde operan principalmente las redes de comunicación actuales como son Wi-Fi, GPS, móvil. La disponibilidad de equipos electrónicos en la parte superior de la banda de ondas mm ha crecido significativamente en la última década. Estas antenas se pueden hacer altamente direccionales. Además, otro aspecto importante de la directividad es que nos proporciona haces estrechos.

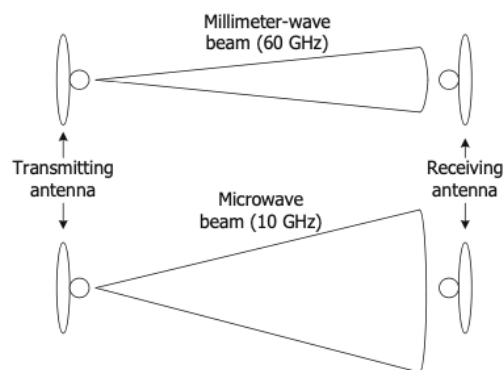


Figura 1. 2 Directividad del haz en onda milimétrica en comparación con el haz en microondas [4]

En el caso de pequeñas antenas integradas, se han desarrollado varias técnicas para mediciones en obleas, utilizando el método de campo lejano como elección natural para las mediciones de antena. Pasemos a explicarlo: una antena irradia ondas esféricas. A cierta distancia de la antena, las ondas esféricas se pueden analizar como ondas planas, lo que facilita y simplifica el análisis de la antena, esa región se denomina como el campo lejano de la antena.

Este método de campo lejano es fácilmente aplicable para antenas de onda milimétrica con ganancia inferior a 20 dB, porque para este caso la medición de campo lejano puede realizarse en un entorno controlado, como una cámara anecoica. [5]

1.3 Software de diseño y simulación

Para diseñar y simular esta antena en tecnología EBG a frecuencias milimétricas se ha usado el software HFSS que pertenece a la suite de ANSYS cuyo significado es “*High Frequency Electromagnetic Field Simulation*”. Este software nos permite la simulación electromagnética y el diseño de antenas a alta frecuencia.



Figura 1. 3 Logo suite ANSYS [3]

Su refinamiento de malla adaptable automático facilita que se pueda enfocar la acción en el diseño en lugar de perder tiempo determinando y crear la mejor malla. HFSS usa tetraedros para formar este mallado. Además, el editor es completamente paramétrico, por lo que los anchos o grosores de los elementos se pueden parametrizar fácilmente para barridos y optimización.

Del mismo modo, se puede dibujar geometría para analizar aspectos como: el comportamiento electromagnético, mostrar campos radiados, investigar impedancias y constantes de propagación, explorar parámetros S o calcular la inserción y las pérdidas de retorno.

La interfaz 3D nos permite realizar cómodamente el diseño con sus múltiples herramientas en el entorno gráfico para la posterior simulación a altas frecuencias. Dicha interfaz se mostrará a continuación:

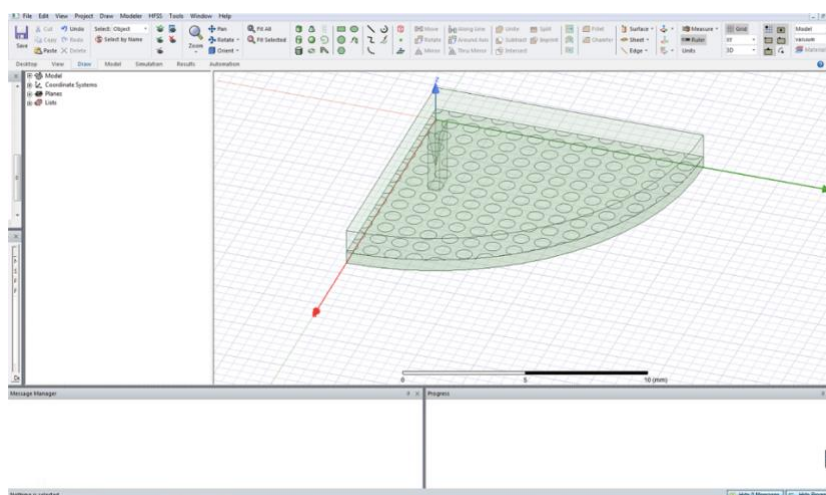


Figura 1. 4 Imagen del entorno de trabajo de HFSS del proyecto

Extrayendo los parámetros de dispersión (S, Y, Z), podemos visualizar los campos electromagnéticos en 3D tanto cercano como lejano. Este software, por tanto, nos brinda una gran cantidad de utilidades para el correcto diseño y simulación de los proyectos planteados.

1.4 Estructura del proyecto

La tecnología EBG ha sido explorada en las últimas décadas para superar con ella las limitaciones de la tecnología convencional. Se usará el EBG por encima de la antena como superestrato para permitir la propagación de la banda D (110-170 GHz)

1.4.1 Especificaciones para el diseño de antena en tecnología EBG

El objetivo del diseño será obtener en torno a 20 dBi de directividad y bajos lóbulos laterales, usando una oblea de silicio que sirva de soporte para generar la cavidad EBG necesaria para el incremento de directividad. La cara inferior de la oblea estará metalizada para hacer de plano de masa y en la superior se imprimirá el superestrato EBG metálico que haga de superficie parcialmente reflectiva. La oblea de silicio tendrá una constante dieléctrica $\epsilon_r = 11.7$ y una altura del superestrato de $h=0,525\text{mm}$. La altura del superestrato viene dada por los sustratos comerciales disponibles. Se ha seleccionado un grosor del que se dispone en el laboratorio para poder fabricar posteriormente el diseño.

Altura (h)	Constante dieléctrica (ϵ_r)	Tamaño
0,525mm	11,7	100mm

Tabla 1. 2 Valores del sustrato disponible en el laboratorio

Se deberá diseñar escogiendo la frecuencia adecuada. La antena en tecnología EBG se va a diseñar y simular en el software HFSS de la suite de ANSYS, lo primero que se debe hacer será obtener los datos necesarios para el diseño de la antena.

1.4.2 Procedimiento a seguir para el diseño

Para este diseño de una antena en tecnología EBG en banda milimétrica, se diseñará una cavidad. Interesa conocer algunos aspectos como: las dimensiones, frecuencia de funcionamiento de la cavidad, su parámetro S_{11} y su reflectividad para posteriormente reproducirlas en la antena.

Hay que tener en cuenta que, además, en el diseño de la cavidad para la antena se debe de producir un mínimo en el punto medio de la cavidad, con el objetivo de poder utilizar el EBG como reflector en nuestra antena.

Una vez que se tengan las dimensiones, la frecuencia de funcionamiento de la cavidad y los parámetros necesarios, se diseñará una antena circular. En dicha antena se colocará la oblea cuya cara inferior estará metalizada para actuar como plano de masa y en la parte superior imprimiremos el superestrato EBG metálico que hará de superficie parcialmente reflectiva.

En la base de la antena se colocará el puerto que estará formado por una guía WR-8 que abarca entre 90-140 GHz con dimensiones 2,032mm x 1,016mm. El puerto será adaptado mediante una pirámide de silicio.

Para la simulación de esta antena se usará sólo un cuarto de la antena ya que simplifica los tiempos de simulación y arrojará los mismos resultados que si se simulase la antena entera. Por otra parte también se cubrirán las cavidades próximas al centro y adyacentes al centro para mejorar la directividad y para que radie por toda la superficie de la antena.

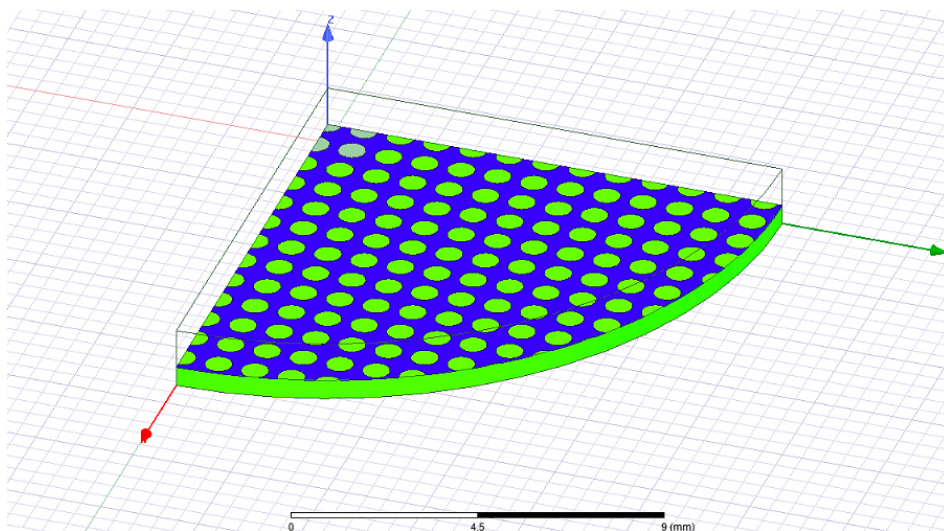


Figura 1. 5 Modelo de antena EBG en el que se aprecia un cuarto de antena

De hecho, a la hora de comprobar los resultados obtenidos se tendrá que poner especial atención en el diagrama de radiación para asegurar que la antena radia por toda su superficie.

CAPITULO 2: NOCIONES BÁSICAS SOBRE TECNOLOGÍA EBG

Con el siguiente capítulo se pretende dar unas nociones básicas sobre la tecnología EBG para entender el diseño de esta antena en dicha tecnología.

2.1 Definición de tecnología EBG

Como se ha mencionado anteriormente la tecnología EBG es aquella que se basa en estructuras periódicas para controlar la propagación de las ondas electromagnéticas en ciertas frecuencias. Estas estructuras periódicas nos permiten seleccionar la frecuencia de propagación de las ondas superando así limitaciones de la tecnología convencional.

Se han producido diversos diseños centrados en polarización circular o en banda dual o ancha. También se han usado superficies no uniformes para conseguir el efecto de lente.[1]

Esta tecnología también ha sido usada en guías de onda, acopladores y multiplexores, los cambiadores de fase, por su parte, han sido desarrollados recientemente. Del mismo modo, el filtrado de microondas, ha sido otro área dónde los materiales EBG han jugado un papel importante. [1]

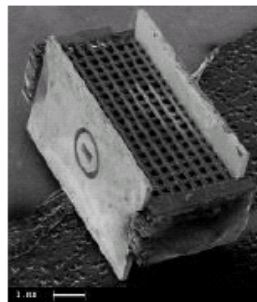


Figura 2. 1 Guía en EBG con transición a guía rectangular [1]

Los metamateriales EBG implican distancias del orden de media longitud de onda o quinta de longitud de onda en algunos y se describen mediante la reflexión de Bragg y otros conceptos de medios periódicos. [1] Además, conforme aumenta la frecuencia, el diseño de una estructura plana que integra la antena, el oscilador local y el mezclador es interesante para obtener un diseño compacto. [1]

Estos diseños mencionados son algunos ejemplos sobre lo que se puede llegar a conseguir con la tecnología EBG. Asimismo, ya se ha mencionado que la mayoría de aplicaciones de esta tecnología EBG se producen en ondas milimétricas y microondas: sistemas reflectores, sistemas GPS de gran precisión, telefonía móvil, Bluetooth y antenas portátiles.

Una aplicación muy interesante de esta tecnología en el rango milimétrico consiste en aprovechar la irradiación de la energía de los cuerpos para configurar un sistema receptor basado en varias antenas con las cuales podemos entender la información de cada una de ellas como píxeles para obtener una imagen en este rango. Esto quiere decir que un material que resulta opaco en el rango visible, puede resultar transparente a frecuencias milimétricas como puede ser niebla, humo o arena. Con ello se obtienen imágenes en condiciones de baja visibilidad.

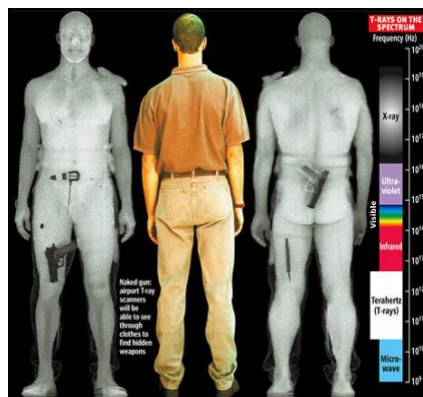


Figura 2. 2 Aplicado en la detección de armas [1]

Las antenas con sustrato EBG, son denominadas como antenas de cavidad. La mejora de la directividad se puede conseguir mediante este tipo de tecnología. En el caso en el que se use sólo una capa como sustrato, esta capa se denominará como parcialmente reflectiva en lugar de EBG.[1]

Una de las opciones de posicionamiento del EBG en una antena sería colocarlo encima como si de un sustrato se tratase. Este sería el caso que atañe a nuestro proyecto, ya que la antena que se diseñará dispondrá de una rejilla sobre la oblea de silicio.

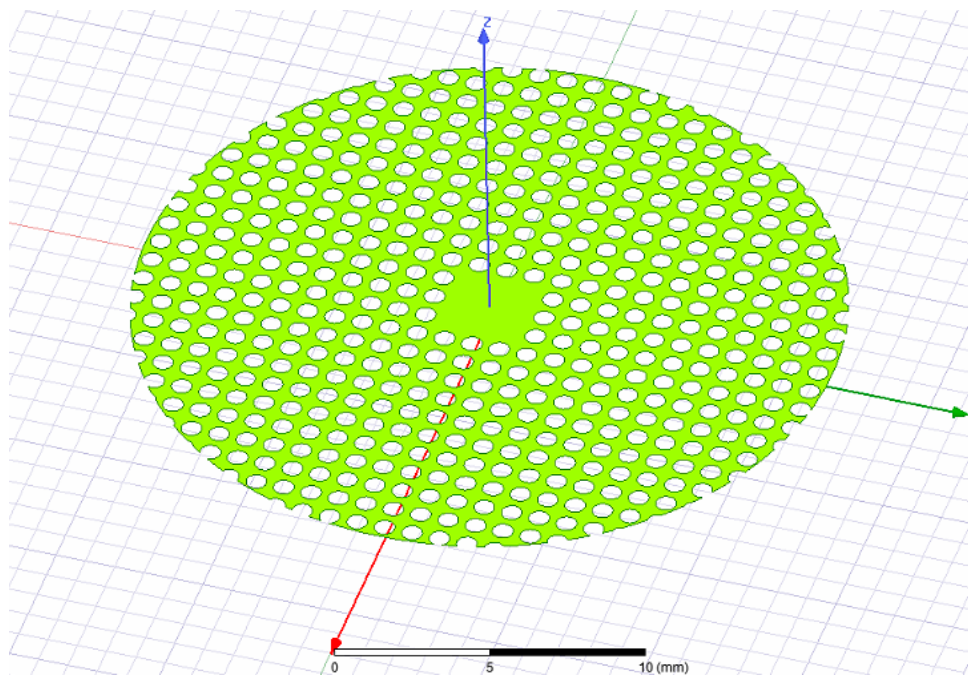
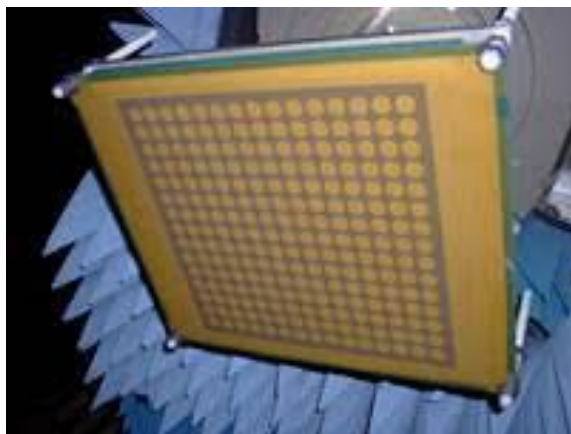
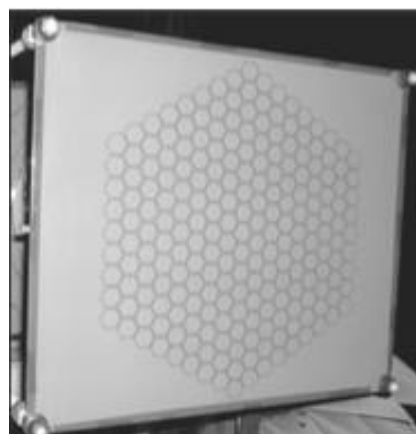


Figura 2. 3 Rejilla superestrato extraída del proyecto

Con una capa EBG uniforme, se puede aproximar la frecuencia de trabajo mediante una simulación de un diseño basado en un par de celdas unitarias. Estas celdas unitarias estarán separadas por λ . Esta distancia se trata del doble entre la rejilla y el plano de masa, denominado longitud de la cavidad. Los patrones del superestrato pueden ser varios; cuadrados, circulares o hexagonales entre otros. A partir de estos patrones de la rejilla del superestrato se podrá diseñar una antena en esta tecnología.

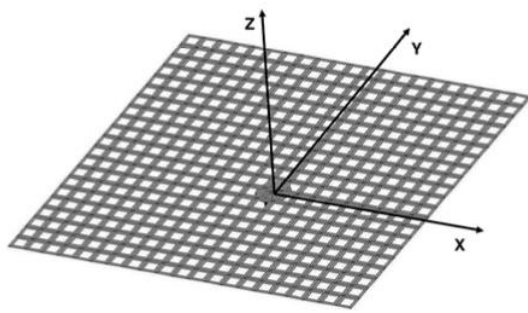


a)

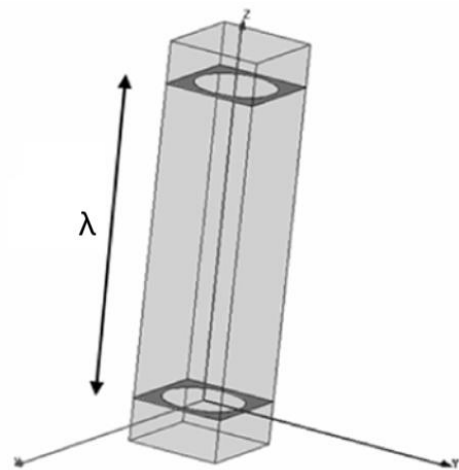


b)

Figura 2. 4 a) Patrón circular superestrato EBG [2] b) Patrón hexagonal superestrato EBG [2]



c)



d)

Figura 2. 5 c) Patrón cuadrados superestrato EBG [2] d) Cavity EBG [2]

CAPITULO 3:

DISEÑOS PREVIOS AL DISEÑO FINAL DE LA ANTENA EN TECNOLOGÍA EBG

En este capítulo se pretende exponer el proceso previo seguido para la realización de esta antena en tecnología EBG de alta directividad a frecuencias milimétricas. Se busca conseguir una cavidad que funcione en torno a 115 GHz y cuya reflectividad sea cercana a 0.98.

3.1 Introducción

Antes de comenzar con el diseño seguiremos unas pautas que se respetaran a lo largo de todo el proyecto:

- Prácticamente todas las simulaciones en el software HFSS para el diseño de esta antena en tecnología EBG, se harán alrededor de 12 pasadas con un error de 0.01, habrá un número mínimo de pasadas dependiendo del diseño, al igual que un número mínimo de pasadas de convergencia. El software informará en el apartado correspondiente del software.
- En las simulaciones se añadirá un barrido *sweep* de tipo *fast* que arrojará los distintos valores necesarios en nuestras simulaciones como pueden ser los parámetros S_{11} , la directividad, los diagramas de radiación, la ganancia entre otros. El barrido será comprendido en la banda D de las ondas milimétricas con intervalos de 0.2 que luego serán más precisos conforme se aproxime a la solución definitiva.
- La distancia entre la rejilla de superestrato y el plano de la masa será de $\frac{\lambda}{2}$. Esta distancia será la altura de nuestro sustrato de silicio donde se formarán las cavidades. Más adelante se explicará la razón de esta distancia.

- Previamente, a cada simulación se le incluirá una capa de radiación que abarque el plano de masa, la oblea de silicio, la rejilla de superestrato, el puerto y el aire.
- Tanto el plano de masa como la rejilla de superestrato serán planos metálicos dotados del campo eléctrico correspondiente. La oblea de silicio tendrá la altura antes mencionada de $h=0.525\text{mm}$, una constante dieléctrica de 11.7 junto a unas pérdidas de $1.54 \cdot 10^{-4}$
- Antes del diseño final de la antena, se realizarán varios diseños para conocer el tamaño de las celdas de la rejilla, tanto el radio como el lado; dos diseños para conocer el parámetro S_{11} y reflectividad más conveniente; y por último el diseño de la adaptación del puerto de la antena.
- En el apartado de resultados se mostrarán las diferentes gráficas de los parámetros S_{11} y los valores de la reflectividad, en los diseños previos al diseño final de la antena. Al igual que los parámetros S necesarios para la adaptación del puerto de la antena.
- Se pasará al diseño de la antena una vez obtenidos los valores que se necesitan que se han obtenido en las simulaciones anteriores. Una vez que se han conseguido los valores se procederá al diseño conociendo la frecuencia de operación de la cavidad EBG y de las dimensiones de la celda unitaria para esa frecuencia de operación.
- La adaptación del puerto se hará a través de una pirámide que adaptará el cambio de un medio con constante dieléctrica 1 a un medio con constante dieléctrica 11.7, dicho medio con constante dieléctrica 11.7 será nuestro EBG, la oblea de silicio.
- La simulación consistirá en analizar un cuarto de la antena ya que se puede extrapolar el resultado a su totalidad. Se mostrará el campo radiado al igual que se visualizará diagrama de radiación.
- Una vez se haya analizado la antena, se mostrarán las gráficas correspondientes a la directividad y ganancia.

3.2 Obtención de dimensiones de la antena EBG

Para este apartado se modelará en HFSS dos diseños, un prisma rectangular que contendrá aire, dentro de este se colocaran dos celdas unitarias de superestrato cuadradas con un orificio circular. Estas celdas unitarias estarán separadas por λ ($\frac{\lambda}{2}$ será el grosor de la oblea de silicio). Entre las celdas unitarias se colocará el sustrato de silicio y se aplicarán condiciones de contorno infinitas, lo que simulará un EBG infinito. Por otro lado, se realizará otro diseño a la par con una sola celda unitaria y el silicio. En dicho diseño se modelará un prisma rectangular de la misma forma que el anterior con la diferencia de que se dividirá por la mitad, de la que se escogerá la parte superior. Con ello se pretenderá comprobar los valores de reflectividad ya que se colocará un plano de masa para la antena.

La oblea de silicio poseerá unas pérdidas que se han obtenido a partir del valor de resistividad que aporta el fabricante. Este valor corresponderá a un valor de conductividad de 0,01S/m que conducirá a $1.54 \cdot 10^{-4}$ como tangente de pérdidas.

Con los dos diseños se buscará un compromiso entre el parámetro S_{11} de la cavidad EBG y el valor de la reflectividad más conveniente.

3.2.1 Cavidad EBG

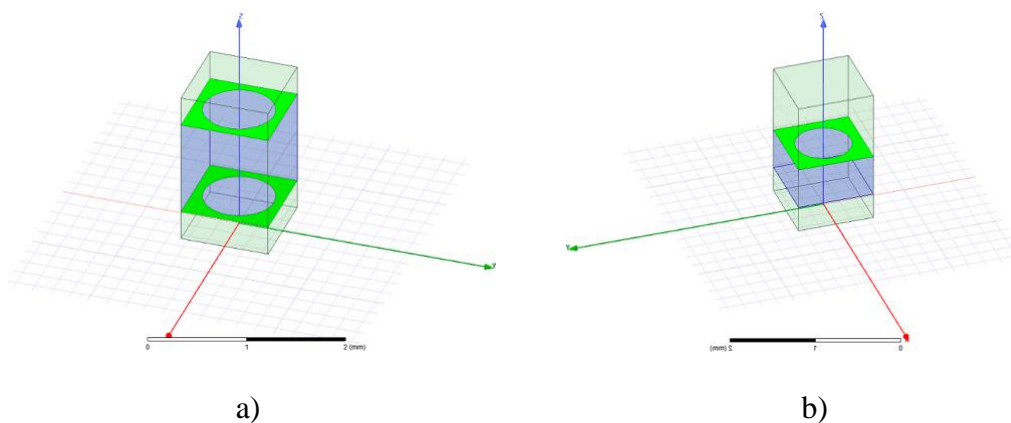


Figura 3. 1 a) Cavidad EBG para ajuste de la frecuencia de resonancia b) Configuración para el cálculo de la reflectividad del EBG

Para obtener los valores del lado de estas celdas unitarias y el radio del orificio se realizarán varios barridos en el rango de frecuencias milimétrico dónde se variarán estos valores. Para ello, se irá acotando el rango de frecuencias poco a poco hasta que se reduzca hasta un rango de interés. Una vez encontrada la mejor configuración se comprobará si se produce un mínimo del campo eléctrico en el punto medio entre las celdas unitarias. Este mínimo es necesario porque en la antena definitiva se sustituirá la mitad del substrato de silicio por un plano de masa. Por lo tanto, el modo que se genere en la cavidad tiene que ser compatible con la colocación del plano de masa, lo que se traduce en que se obtenga un mínimo en la mitad del substrato. La frecuencia de funcionamiento no es tan crítica siempre que esté cercana a los 115 GHz.

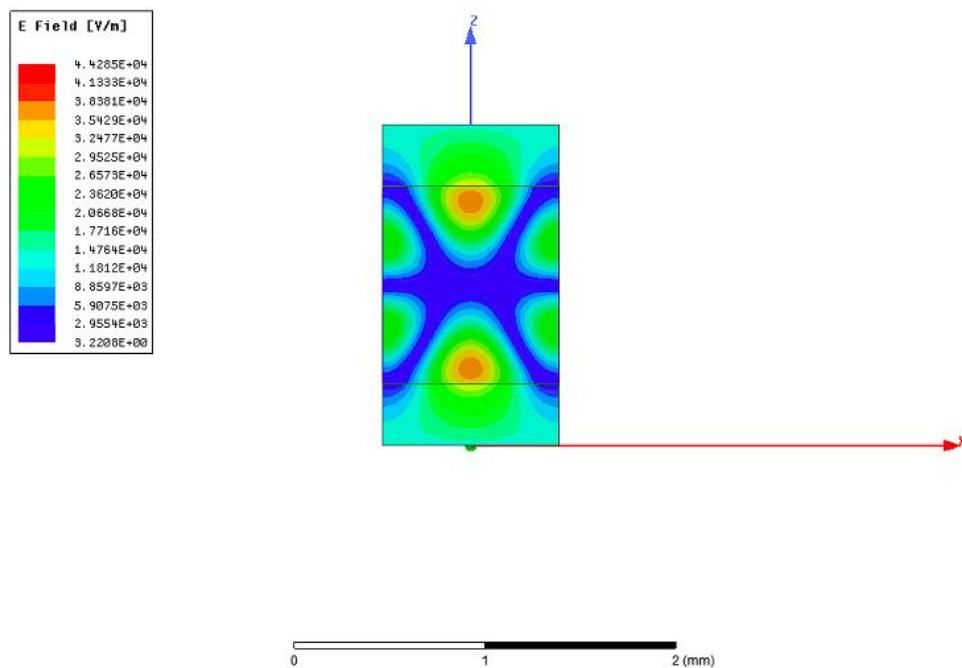


Figura 3. 2 Mínimo del campo eléctrico en el punto medio de la cavidad EBG

Entre los diferentes parámetros de S_{11} que se han obtenido se comprobará la reflectividad mediante el otro diseño con una sola celda unitaria para obtener el compromiso entre reflectividad y parámetros S_{11} .

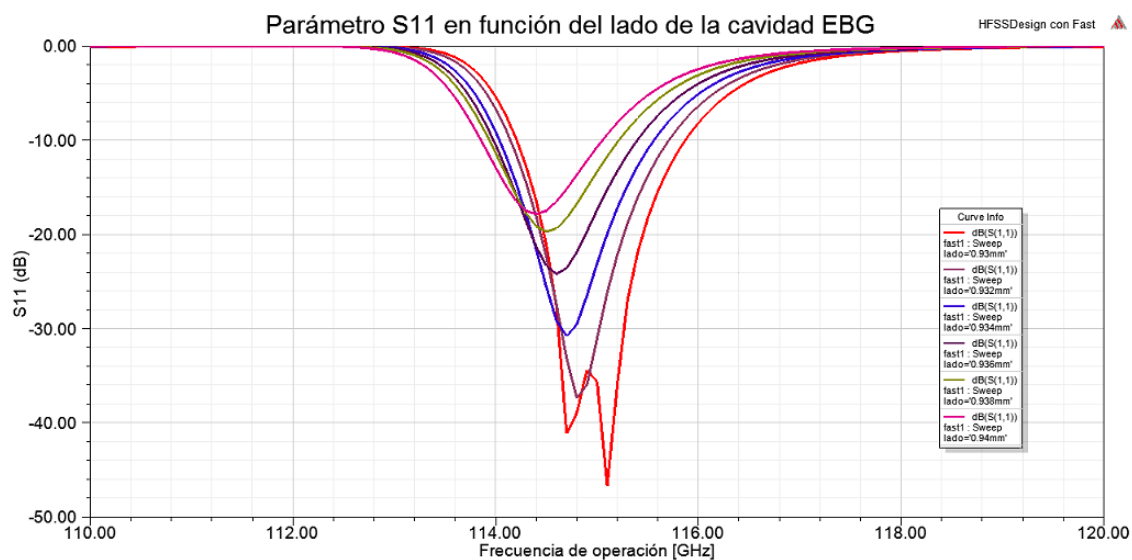


Figura 3. 3 Parámetro S11 en función del lado de la cavidad EBG

Lo que se pretenderá con ello es obtener los valores de reflectividad asociados a los parámetros S_{11} del diseño anterior. De estos, se elegirá el mas conveniente. Este segundo diseño se debe a que se colocará un plano de masa en la base.

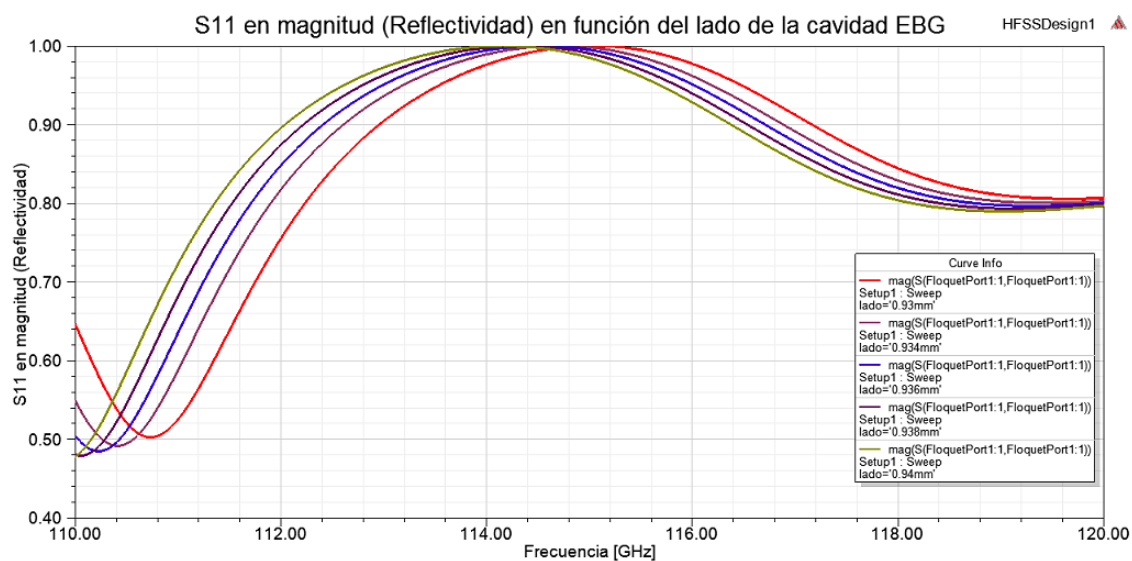


Figura 3. 4 Reflectividad en función del lado de la cavidad EBG

Se llegará al compromiso entre la reflectividad y el parámetro S_{11} con el lado de la cavidad igual a 0,934mm que se muestra a continuación:

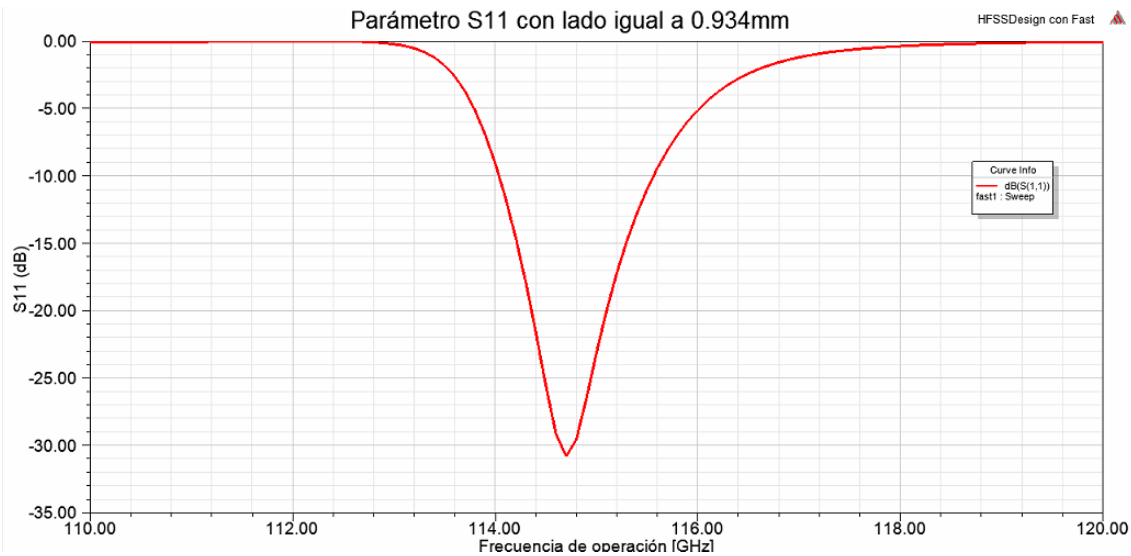


Figura 3. 5 Parámetro S_{11} con lado igual a 0.934mm

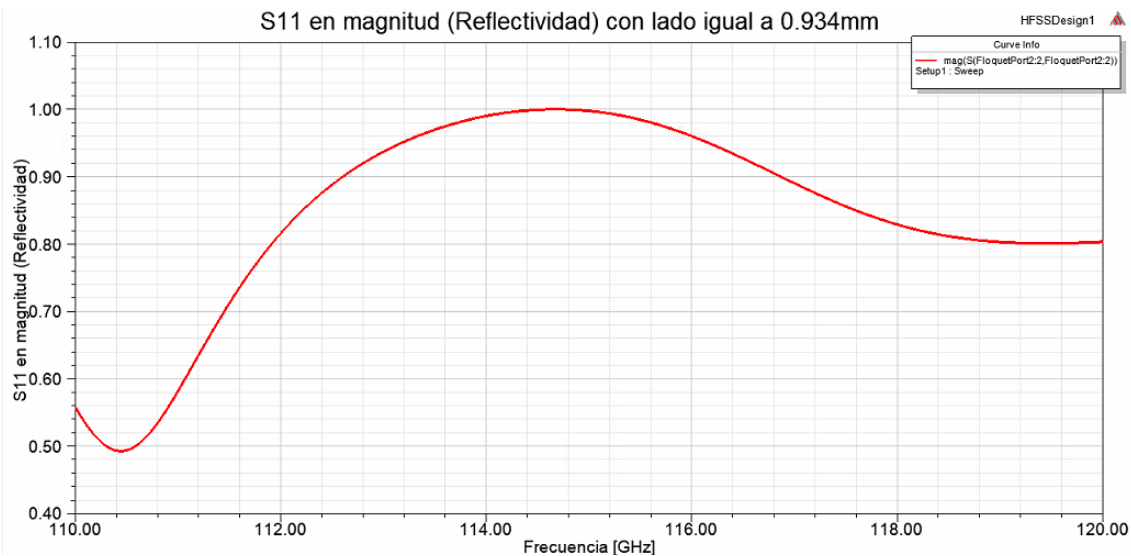


Figura 3. 6 Reflectividad con lado igual a 0.934mm

La frecuencia de operación de la cavidad estará en torno a 115GHz, a 114,70GHz. Con estos datos que se muestran a continuación se modelará la antena en el siguiente capítulo:

Radio (mm)	Lado (mm)	S_{11} (dB)	Reflectividad	Frecuencia de operación (GHz)
0.34091	0.934	-30.79	0.98	114,70

Tabla 3. 1 Parámetros de la cavidad EBG

3.3 Adaptación del puerto

En la base de la antena se colocará el puerto que estará formado por una guía WR-8 que abarca el rango de frecuencias entre 90-140 GHz con dimensiones 2,032mm x 1,016mm. La adaptación del puerto se realizará mediante una forma piramidal de base rectangular.

Se modelará en el software de diseño la guía WR-8 con sus correspondientes dimensiones con una pirámide inversa en su interior con base 2,032mm x 1,016mm. La longitud de la guía será de 2,8mm y para la obtención de la altura de la pirámide se ha realizado un barrido con distintos valores de un factor entre la longitud de la guía y la altura de la pirámide, se ha escogido el factor más apropiado respecto a la frecuencia de operación de la cavidad.

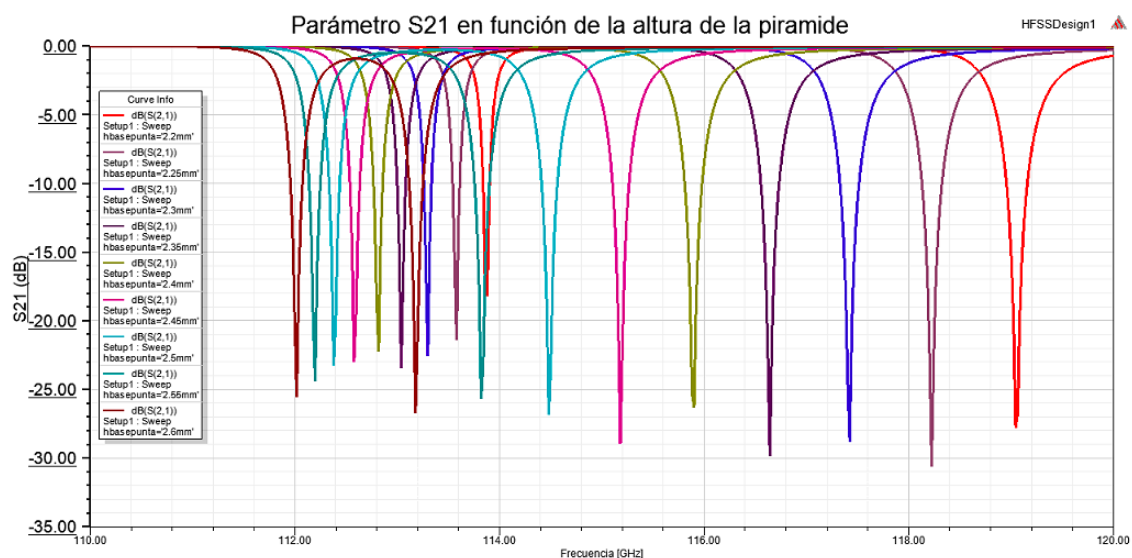


Figura 3. 6 Parámetro S_{21} en función de la altura de la pirámide

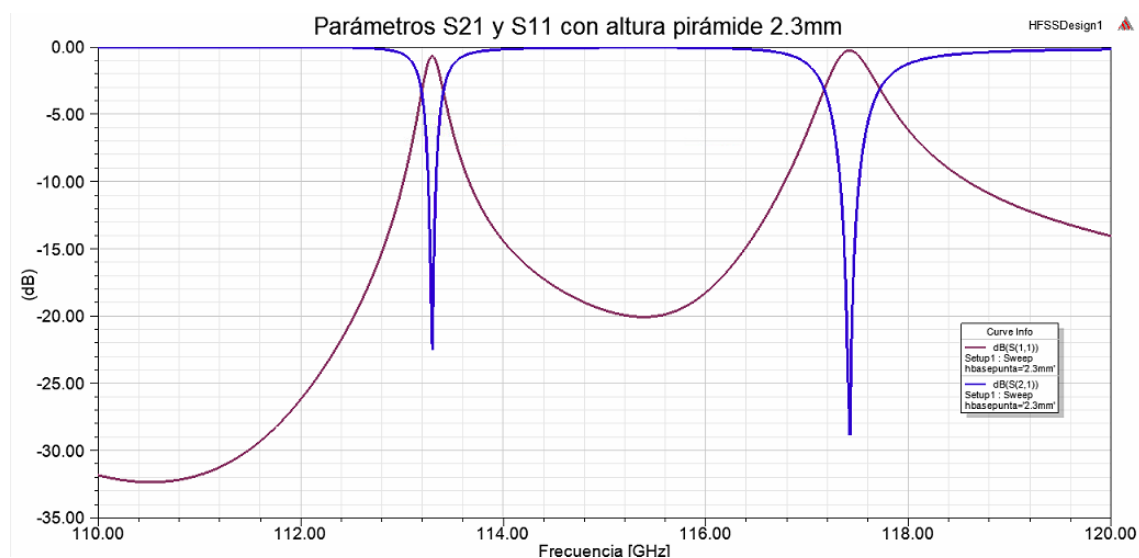


Figura 3. 7 Parámetros S_{21} y S_{11} con altura pirámide 2.3mm

Se aplicará este factor escogido para las dimensiones de la pirámide que serán 2,032mm x 1,016mm para la base y una altura de 2,3mm. Esta pirámide estará formada de silicio.

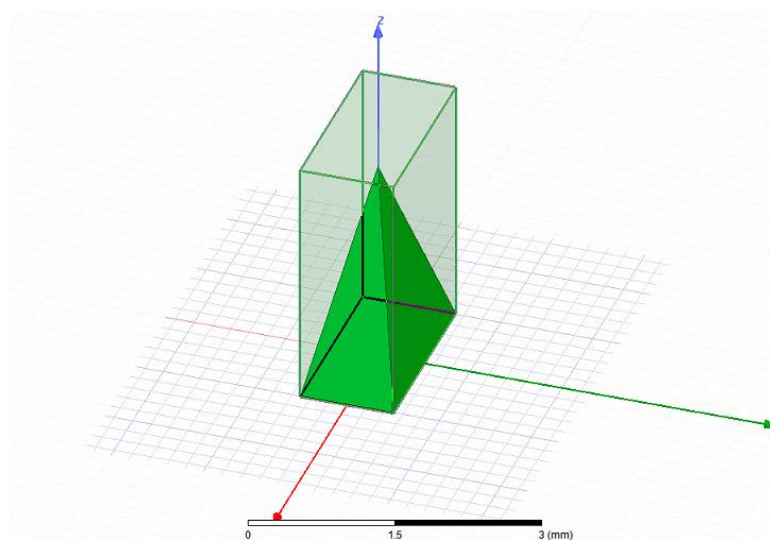


Figura 3. 8 Guía WR8 con pirámide en su interior para adaptación del puerto extraído del proyecto

Por lo tanto, en este capítulo se ha diseñado tanto el EBG que se quiere utilizar en el diseño de la antena para aumentar la directividad, como la adaptación necesaria en el puerto de la antena para poder adaptar la guía rellena de aire al sustrato de silicio de la antena.

CAPITULO 4: DISEÑO Y ANALISIS DE LA ANTENA

Una vez que se han diseñado las diferentes partes de la antena se pasará al diseño de la antena completa. Se modelará un plano de masa circular con radio 11,675mm en el que el centro de este se hará un agujero rectangular con las dimensiones de la guía de onda WR8 que alimentará la antena como se ha comentado anteriormente con dimensiones 2,032mm x 1,016mm para su posterior colocación. Encima de este plano de masa se colocará nuestra oblea de silicio con el grosor de 0,525mm que actuará como cavidad con el mismo radio que el plano de masa. Sobre la oblea de silicio se posicionará una rejilla metálica de superestrato que estará compuesta por un conjunto de celdas unitarias adyacentes unas a otras por la cara superior del silicio. Una vez modelado esto se añadirá la guía con la pirámide en su interior en la base de la antena.

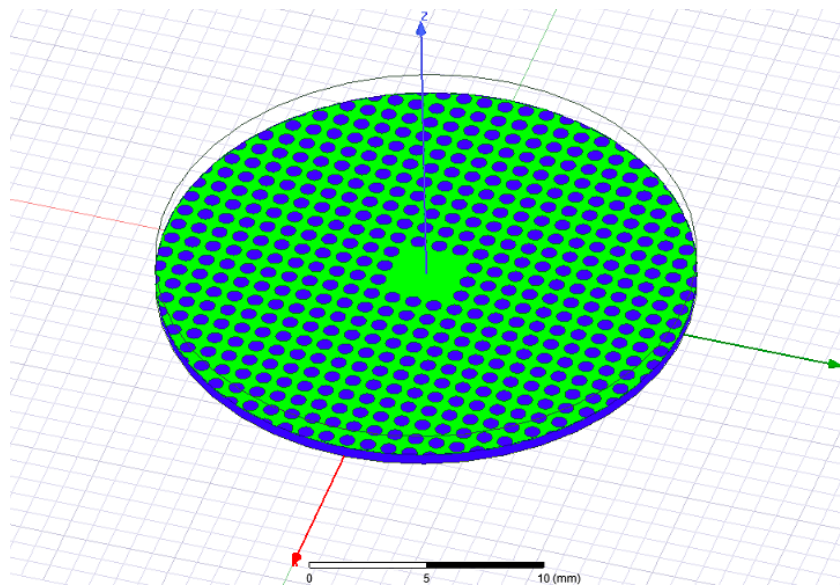


Figura 4. 1 Imagen de la antena EBG

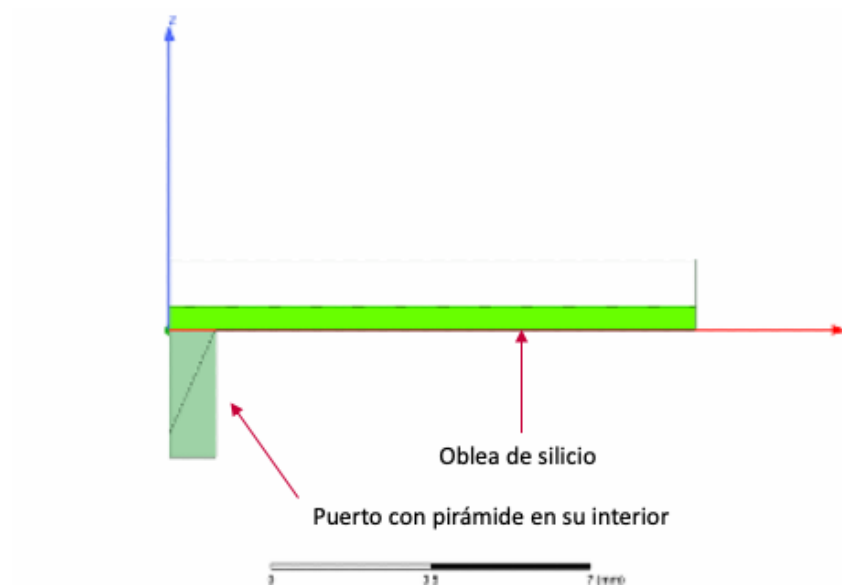


Figura 4. 2 Imagen de un cuarto de antena EBG de perfil

4.1 Diseño de la antena

Respecto al diseño de la antena se comenzará por modelarla en el software HFSS, se analizará un cuarto de la antena ya que se puede extrapolar el resultado a su totalidad y las simulaciones se realizarán en un intervalo más pequeño de tiempo.

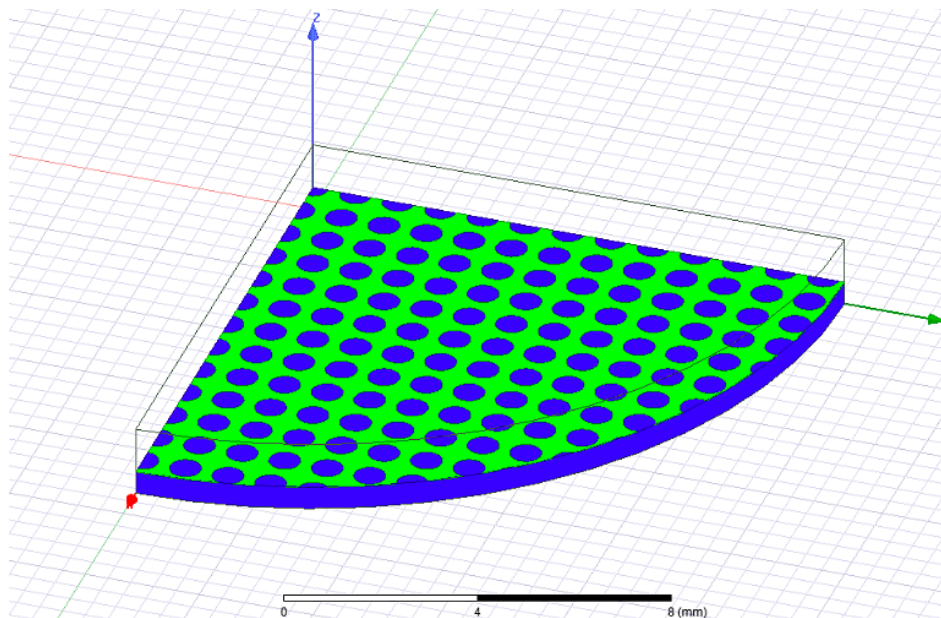


Figura 4. 3 Imagen de un cuarto de antena EBG

Una vez se ha modelado este diseño con los datos obtenidos de los diferentes componentes de la antenna, se pasará a analizar el campo radiado de la antenna.

Las primeras simulaciones daban como resultado que el campo era radiado prácticamente en su totalidad por el centro de la antenna, más exactamente por los orificios centrales y las ondas no se propagaban a través de la cavidad (ver figura 4.4). Se cambiará el radio de la cavidad para observar si con ello se conseguirá la propagación a través de la cavidad de silicio.

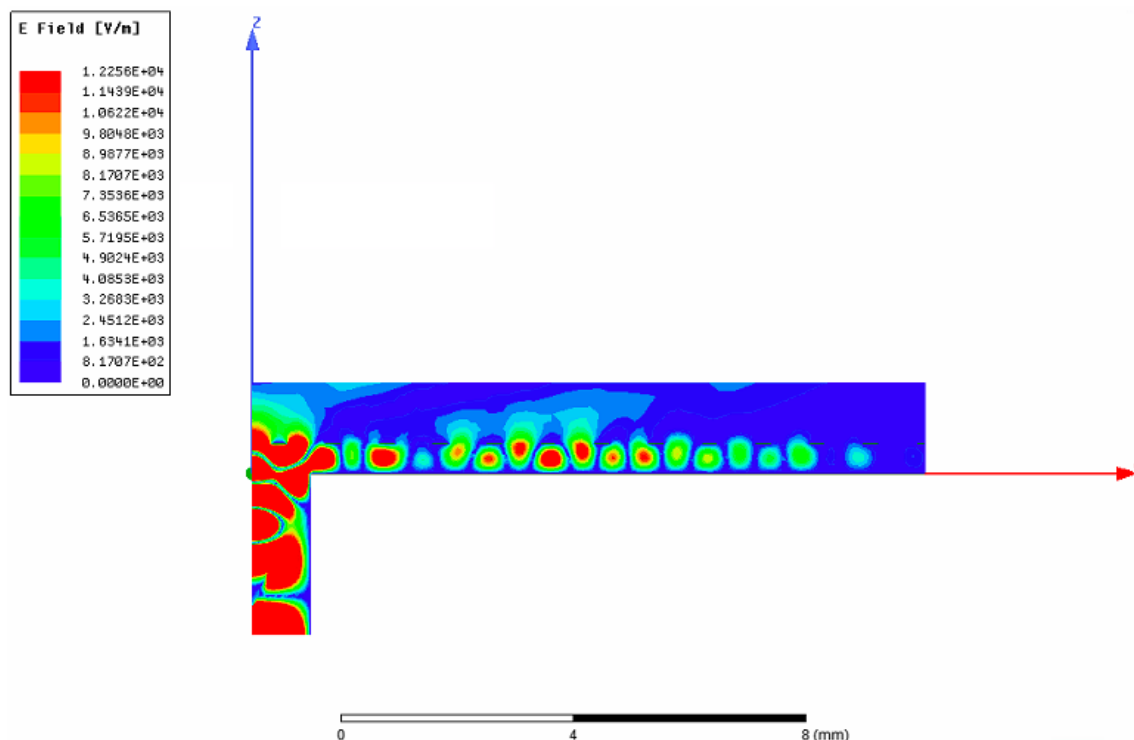


Figura 4. 4 Campo radiado por el centro de la antenna EBG

Se obtuvo el siguiente diagrama de radiación, directividad y ganancia:

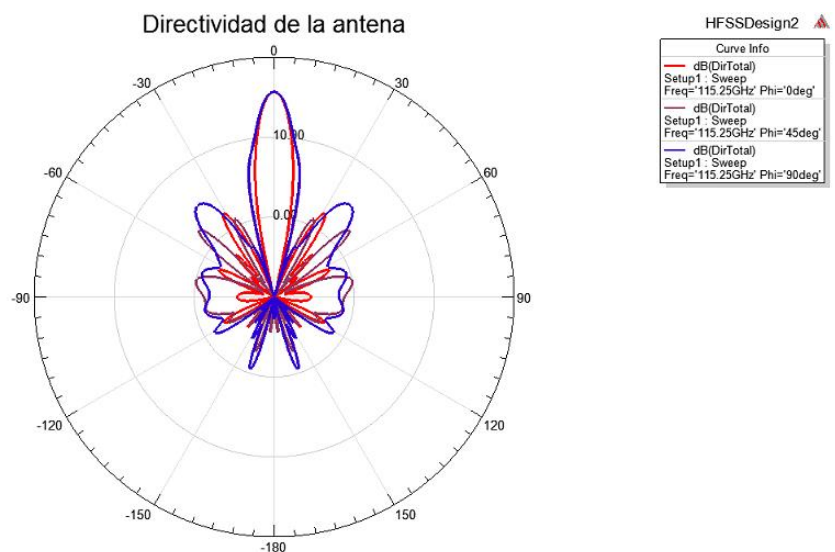


Figura 4. 5 Diagrama de la directividad de la antenna EBG sin cubrir orificios

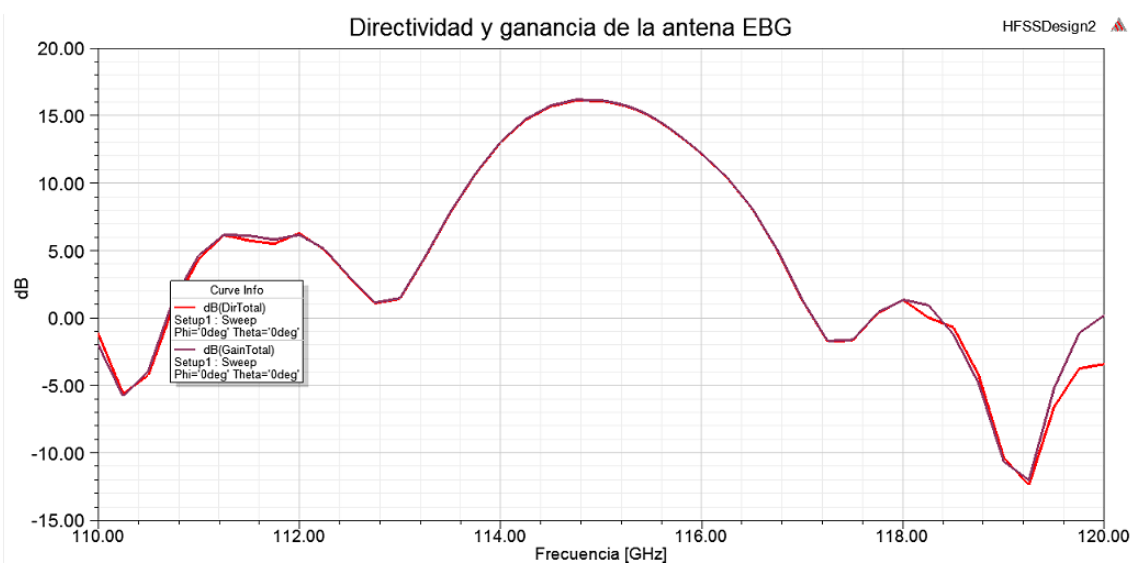


Figura 4. 6 Gráfica directividad y ganancia de la antenna EBG sin cubrir orificios

Tras comprobar si la variación del radio de la cavidad permitía la propagación a lo largo de la oblea de silicio, se llegó a la conclusión de que no se mejoraría este aspecto entonces se propuso otra idea para permitir la propagación.

Se decidió cubrir el orificio central para ver si mejoraba la propagación por la cavidad. Una vez llegado a este punto se comprobó que gracias a cubrir el orificio central de la antena la propagación por la cavidad formada en el silicio se mejoraba, pero no se obtenían los resultados esperados.

Llegado a este punto se realizó una prueba que consistía en cubrir además del orificio central de la antena, los orificios adyacentes a este orificio central. Con esta configuración se conseguirá la propagación por la cavidad. La superficie que ha sido cubierta coincidirá aproximadamente con el área que ocupará el puerto. También se probará a cubrir más orificios pero una vez vistos los resultados se desecharon ya que al cubrir la superficie que corresponde al puerto arrojará los mejores resultados.

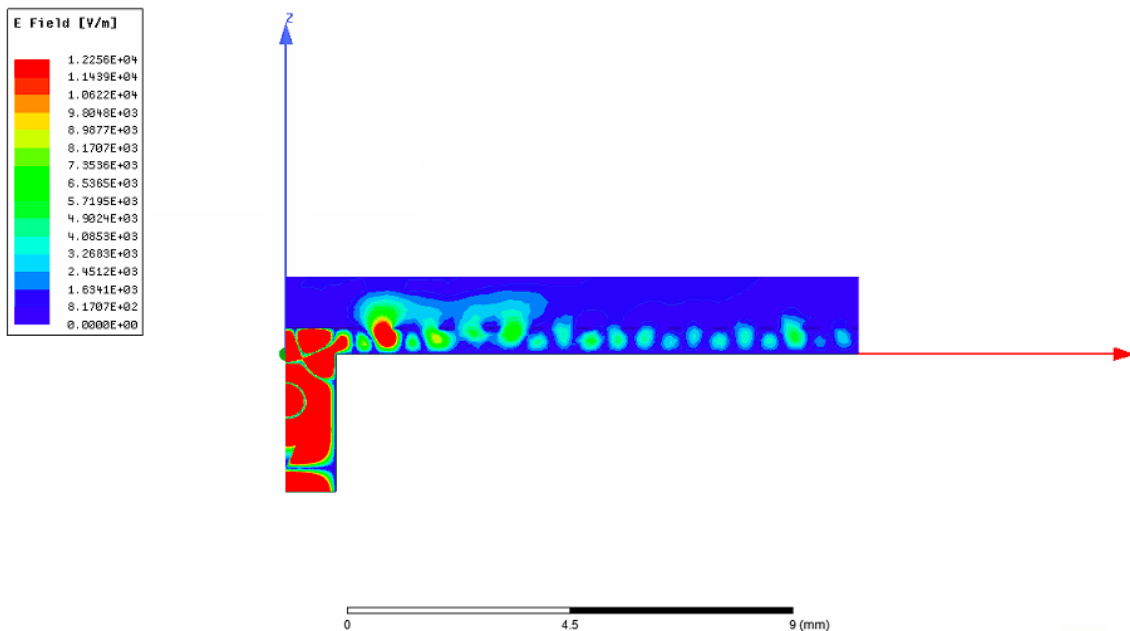


Figura 4. 7 Campo radiado por la rejilla de la antena EBG

La frecuencia de operación de la antena nos variará respecto a la frecuencia de operación que se había obtenido en la cavidad puesto que se ha simulado en un plano infinito y la antena se trata de un plano finito.

Un parámetro importante es el radio de la antena puesto que queremos que se propague por toda la cavidad producida dentro de la oblea de silicio. Se harán diferentes simulaciones para la obtención de este radio. Se pondrá especial atención a los valores de directividad que sean devueltos por las diferentes simulaciones.

4.2 Resultados obtenidos

En este apartado se procederá a mostrar los resultados obtenidos de esta antena en tecnología EBG mediante diferentes diagramas y gráficas obtenidas; también se expondrán los resultados obtenidos.

Algo importante a mencionar es la necesidad de cubrir los orificios de la zona central de la antena para que se produzca la propagación correcta a través de la cavidad.

El mejor valor respecto a directividad obtenido es en torno a 20 dB a una frecuencia de operación de 115,25 GHz como se muestra en la figura 4.8:

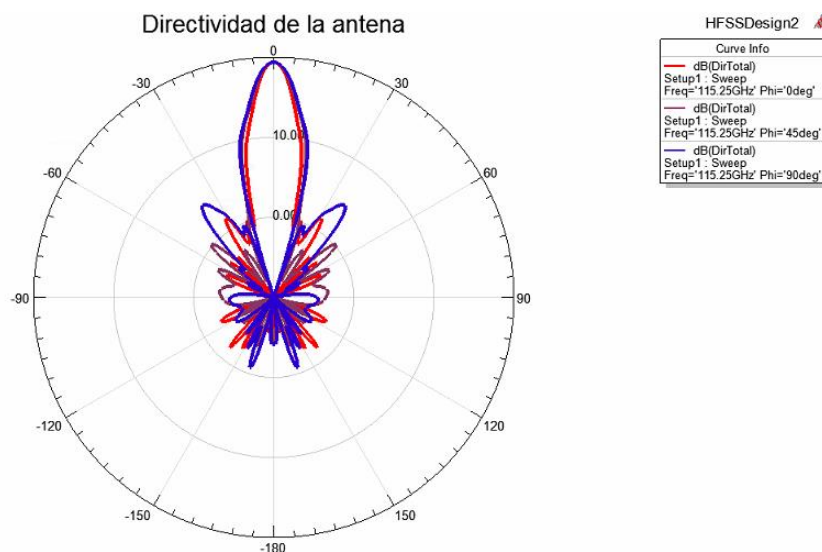


Figura 4. 8 Diagrama de la directividad de la antena EBG

Por otro lado, se muestra la directividad tanto copolar como crosspolar en la figura 4.9:

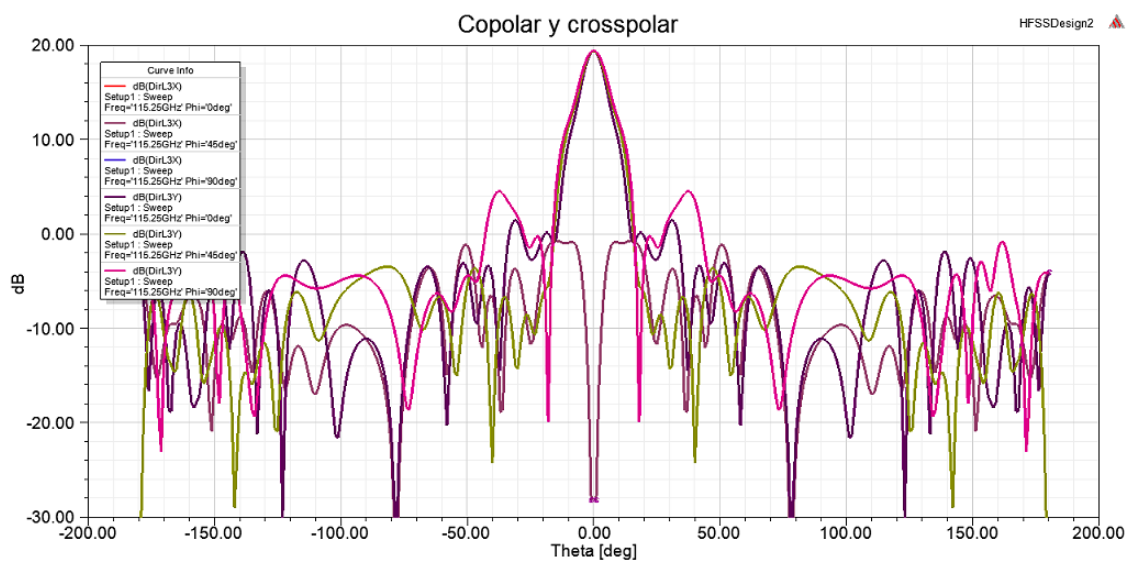


Figura 4. 9 Directividad copolar y crosspolar de la antena EBG

A continuación, se mostrarán las gráficas de directividad y ganancia:

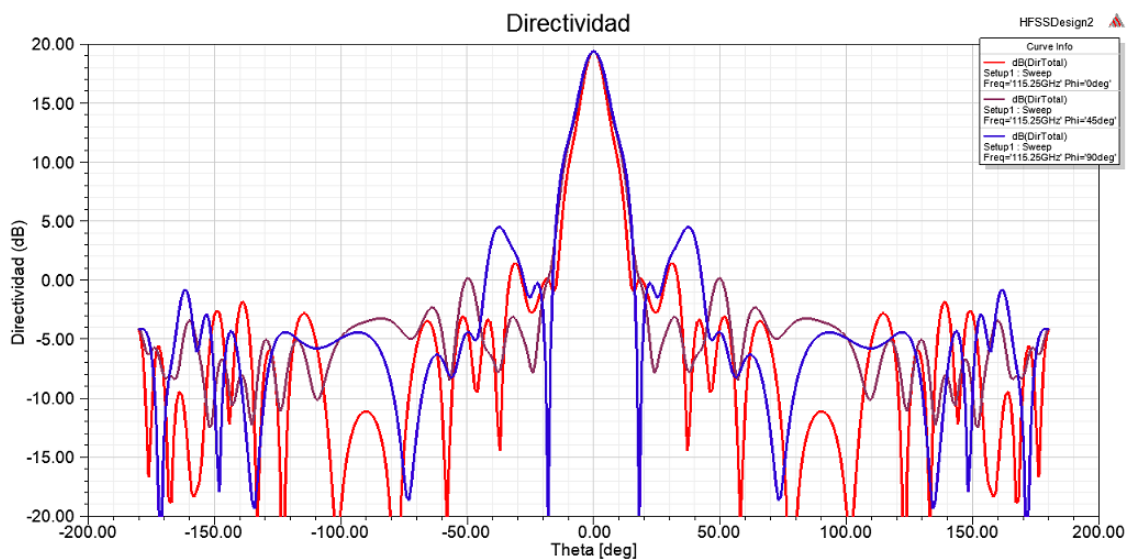


Figura 4. 10 Directividad de la antena EBG

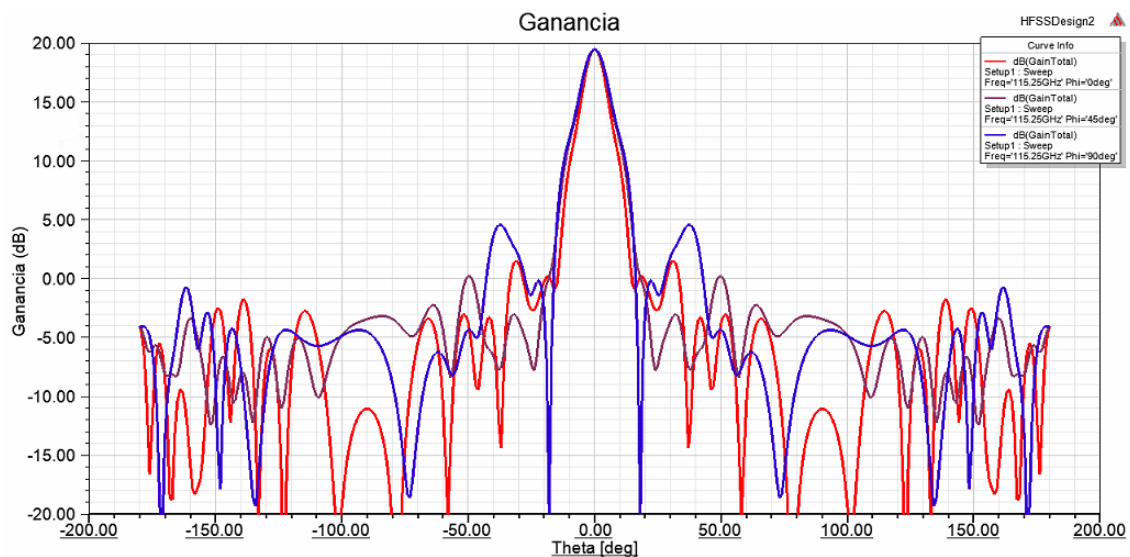


Figura 4. 11 Ganancia de la antenna EBG

También se puede apreciar en la figura 4.12 el valor asociado a la directividad y a la ganancia de la antenna en función de la frecuencia:



Figura 4. 12 Gráfica directividad y ganancia de la antenna EBG

Por otra parte, se mostrará a continuación en la figura 4.13 el S_{11} de la antena:

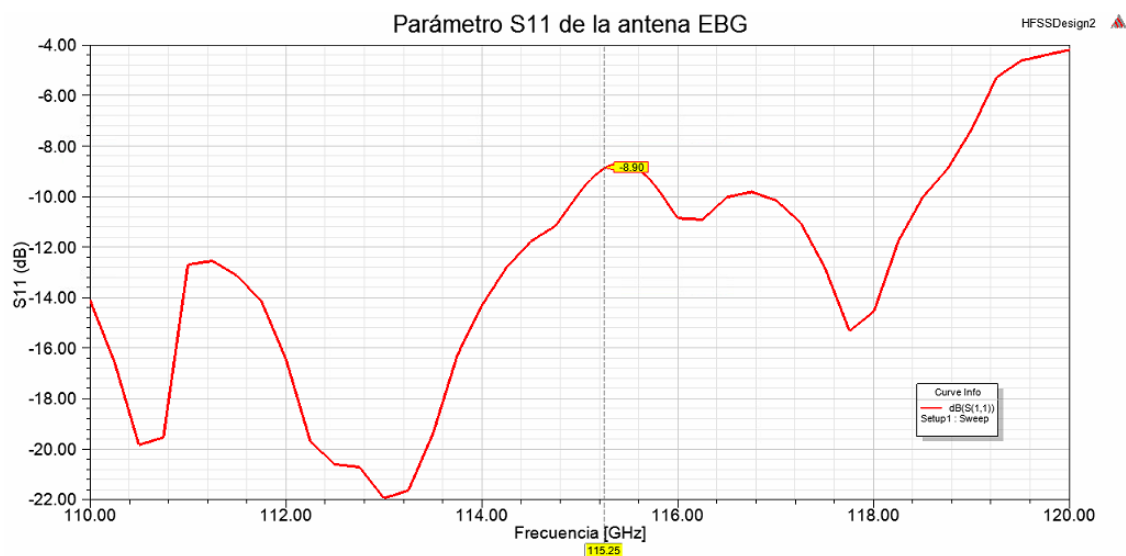


Figura 4. 13 Parámetro S_{11} correspondiente a la antena EBG

Este valor de S_{11} se podría optimizar mediante la pirámide del puerto de alimentación. A continuación, se muestra el parámetro S_{11} de la antena en el caso de no haber una pirámide de silicio en el interior del puerto.

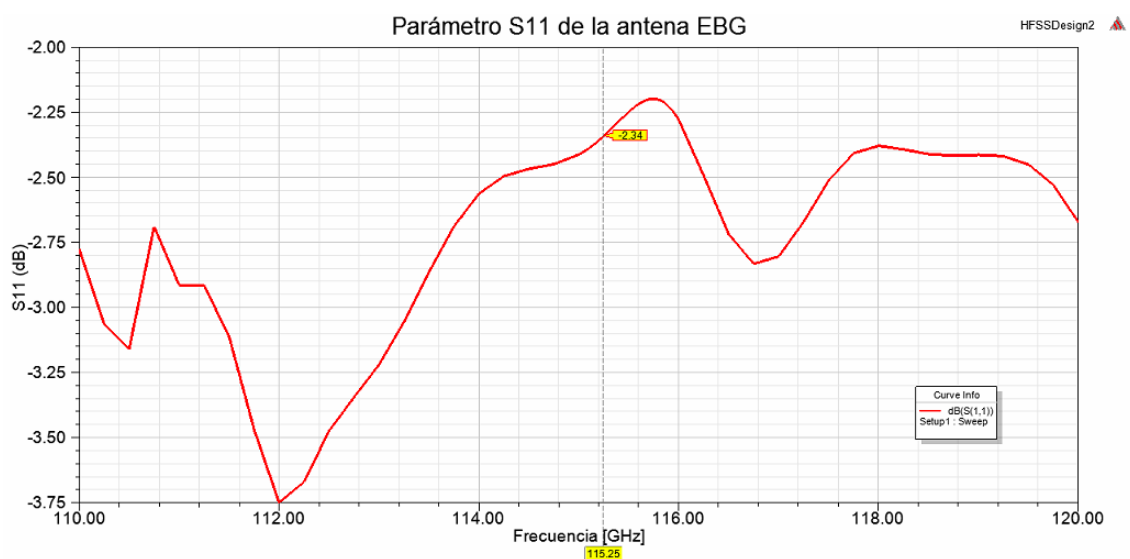


Figura 4. 14 Parámetro S_{11} de la antena EBG sin pirámide

Por lo tanto, se ha conseguido diseñar una antena de cavidad EBG con una directividad de 20 dBi utilizando un sustrato de silicio como base y un superstrato metálico.

CAPITULO 5:

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este trabajo de fin de grado se ha realizado el diseño de una antena en tecnología EBG para su posterior fabricación en la sala limpia del laboratorio. Como se ha visto a lo largo del proyecto, será posible llegar a conseguir una directividad en torno a 20 dB para una antena en esta tecnología. Se ha podido observar cómo aprovechar el sustrato de silicio como cavidad y la rejilla de superstrato como reflector.

Se ha diseñado para ello una cavidad EBG que resuena en torno a 115 GHz y con un valor de reflectividad elevado. Para ello se han ajustado las dimensiones de un superstrato EBG que consiste en un patrón rectangular de agujeros circulares en una capa metálica. Este EBG se ha utilizado como superstrato de la antena de cavidad estudiada.

Otro aspecto a destacar, es la adaptación del puerto en forma piramidal que solventará el problema del cambio de medio tan abrupto que se produce entre el aire y el sustrato de silicio en el puerto, ya que se produce una adaptación correcta.

Este proyecto puede ser de utilidad para futuras investigaciones acerca de este tipo de antenas en tecnología EBG. Poco a poco se avanza con la tecnología EBG para superar las barreras de la tecnología convencional y puede ser el primer paso para la fabricación de una antena de cavidad EBG a frecuencias milimétricas utilizando como sustrato base silicio.

El presente proyecto, no obstante, tiene ciertas líneas de mejora como la optimización del puerto de la antena o el radio de la antena. El desafío sería fabricar y medir este diseño en la sala limpia del laboratorio con el equipamiento del Grupo de Antenas de la UPNa.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Design, Fabrication and Measurement of EBG Structures and their Application in Antennas Field and Reflecting Surfaces*, Juan Carlos Iriarte
- [2] *EBG Superstrate Array Configuration for the WAAS Space Segment*
- [3] <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss/hfss-capabilities#5>
- [4] *Millimeter-Wave Research Challenges* Božanić, M., Sinha, S. 2019 *Smart Sensors, Measurement and Instrumentation* 34, pp. 31-53
- [5] *Antenna measurements at millimeter and submillimeter wavelengths* Räisänen, A.V., Ala-Laurinaho, J., Crowe, T., (...), Castañer, M.S., Viikari, V. 2018 *Signals and Communication Technology* pp. 409-450